



等価線形解析に基づくRC造建物-杭-地盤連成系を対象とした耐震診断法に関する研究

著者	山添 正稔
号	58
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第004886号
URL	http://hdl.handle.net/10097/58987

氏 名	やま ぞえ まさ とし 山 添 正 稔
授 与 学 位	博士(工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成25年9月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)都市・建築学専攻
学 位 論 文 題 目	等価線形解析に基づく RC 造建物-杭-地盤連成系を対象とした 耐震診断法に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 前田 匡樹
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 前田 匡樹 東北大学教授 源栄 正人 東北大学教授 植松 康

論文内容要旨

鉄筋コンクリート造建物を対象とした現行の耐震診断法は、上部構造の耐震性を評価するものであり、杭基礎建物の場合でも杭基礎の耐震性は評価対象とされない。しかしながら、2011 年東北地方太平洋沖地震において、杭基礎の被害によって建物が沈下、傾斜したために、上部構造には大きな被害が生じていなくても解体される事例が見られたように、建物の地震後の継続使用性も含めて耐震性を評価する際には、上部構造と杭基礎の両方を対象とした耐震診断法が必要となると考えられる。

この状況を背景として、本研究では、上部構造と杭基礎-地盤系の耐震診断法の構築を目的に、両者の破壊モードの判別法と、それを用いた耐震診断法の提案を目的として検討を行った。そのために、まず過去の大地震で被害を受けた実際の RC 造杭基礎建物の被害事例分析を行った。ここでは、上部構造に被害を受けた学校建物と、杭基礎に被害を受けた学校建物の 2 つの杭基礎建物を対象に、非線形相互作用の影響の観点から地震時応答について分析を行い、実被害と解析結果の対応関係について検討した。この検討から、杭基礎建物の応答評価では、杭基礎・地盤条件を踏まえて、非線形相互作用を考慮した検討が必要であることを示し、これによって耐震診断法についても杭基礎を含めた手法が必要であることを現状の課題として示した。

その課題の解決を目的として、まず杭基礎-地盤系の非線形性を考慮した 2 質点系の Sway モデルによる等価線形化法について検討を行った。次に、上部構造と杭基礎-地盤系の耐震診断法を提案した。ここでは、Sway モデルの等価線形化法に基づく耐震診断法である詳細法と、上部構造と杭基礎の個別評価に基づく耐震診断法である簡便法の 2 種類の手法を提案した。最後に、以上で検討した等価線形化法および耐震診断法を、事例検討で対象とした学校建物に適用して上部構造と杭基礎の耐震性について評価した。

本論文は全 6 章で構成されており、以上の検討から得られた結果を各章ごとに以下にまとめる。

第 1 章は序論であり、本論文の背景、目的を述べて本研究の意義を示すとともに、既往の関連研究の現状をま

とめた。その中で、本論文の主目的と関連する基礎の耐震診断法の既往研究では、基礎の耐震性の評価が目的となっており、上部構造は評価対象外である。一方、現行の耐震診断は上部構造の耐震性のみを対象としている。そのため、上部構造と杭基礎の応答バランスを適切に評価していれば、上部構造よりも杭基礎を補強する必要があると判定される場合でも、現行では補強の要否の判定対象が上部構造のみとなるため、上部構造に対しては過剰な補強となる可能性もあり、2011 年東北地方太平洋沖地震においては実際にそのような事例が見られている。このことから、上記の既往の基礎の診断法や現行の耐震診断法で対象としていない、上部構造と杭基礎の応答バランスを考慮した手法の構築は重要であり、この点が本研究で検討する診断法の新規性であると考えられる。

第2章では、上部構造破壊事例として、2008 年岩手・宮城内陸地震で上部構造に被害を受けた岩ヶ崎高校を取り上げ、その被害要因について非線形相互作用の影響の観点から分析を行い、実被害と解析結果の対応関係について検討を行った。

建物の主な被害は、多くの柱に見られた損傷度 \sim の柱頭、柱脚の曲げひび割れやせん断ひび割れであり、これに基づく被災度区分判定により各階とも中破に近い小破と判定された。この損傷度から本震時の建物の最大層間変形角は $1/120$ 程度と推定された。

建物の地震応答解析においては、杭体と杭周ばね、側面ばねをいずれも線形としたケースは、本震部分の最大層間変形角は実被害から評価した上記の推定値よりも過大となり、余震部分のフーリエスペクトル比($3F/1F$)の1次振動数は、余震記録よりもやや低振動数側となった。それに対して、杭体と杭周ばねを非線形とし、側面ばねを無視したケースは、最大層間変形角は推定値よりも過小となり、フーリエスペクトル比の1次振動数は余震記録よりも高振動数側となった。次に、側面ばねの影響検討として、杭体と杭周ばねを非線形とし、側面ばねを線形としたケースは、これらをいずれも線形としたケースに近い応答となった。また、杭周ばねと同様の方法で側面ばねに非線形性を考慮したケースは、側面ばねの剛性低下が大きくなり、側面ばねを無視したケースとほぼ同じ応答となった。この側面ばねの剛性について、基礎幅(11m)を直径とする等価円の剛基礎を加振した場合の基礎端部の近傍のひずみから、0.6 倍に低減して近似的に非線形性を考慮したケースでは、最大層間変形角は推定値と概ね対応し、フーリエスペクトル比も余震記録と概ね対応した。

第3章では、杭基礎破壊事例として、2011 年東北地方太平洋沖地震で杭基礎に被害を受けた古川東中学校を取り上げ、その被害要因について非線形相互作用の影響の観点から分析を行い、実被害と解析結果の対応関係について検討を行った。

校舎建物では、最大 80cm 程度の沈下と最大 $1/25$ 程度の傾斜が生じた。また、杭頭部分の掘削調査によって、杭頭の回転と曲げ圧縮破壊による破損を確認し、杭の引抜調査によって GL-3m 程度の杭中間部の破損や曲げひび割れを確認した。

地震応答解析では、杭頭剛接合の場合は杭頭位置、杭頭ピン接合の場合は腐植土層の下端位置で、最大塑性率が終局点塑性率を超え、上記の杭の被害状況と概ね対応した。一方、地盤変形のみを入力した場合は、塑性率が1以下であった。このことから、今回の被害は、杭頭付近の軟弱な腐植土層のために、建物からの慣性力の大部分が杭に伝達することで杭応答が大きくなり、杭頭位置が曲げ圧縮破壊に至ったことが要因であると考えられる。

この結果と第2章の岩ヶ崎高校の結果の比較考察から、非線形相互作用を考慮することにより、岩ヶ崎高は上部構造、古川東中は杭基礎に被害が発生する結果となり、実被害状況と概ね対応することを示した。また、基礎固定モデルによる上部構造の応答は、両建物ともに、杭基礎・地盤条件を考慮した場合よりも大きくなり、実被害よりも大きめに評価された。このことから、杭基礎建物の応答評価では、杭基礎・地盤条件を踏まえて、非線形相互作用を考慮した検討が必要であることを現状の課題として示した。

第4章では、杭基礎建物の耐震診断への適用を念頭に、非線形のSwayばねを考慮した上部構造と基礎の2質点のSwayモデルによる等価線形化法について検討した。

Swayモデルの設定において、Swayばねの非線形性を評価する際には、上部構造-杭基礎一体モデルから上部構造を取り除いた杭基礎-地盤系のみのモデルを用いた静的解析を行い、それによって評価される杭頭水平力と杭頭変形の関係を、Swayばね（杭基礎-地盤系）の復元力特性として定義した。この静的解析では、地盤応答解析によって評価される地盤変形の最大値分布を作用させてから杭頭を加力する方法と、杭頭加力のみによる方法の2種類の方法を示した。

2質点のSwayモデルによる等価線形化法として、上部構造と杭基礎-地盤系の非線形性を表わす等価剛性を用いたモーダルアナリシスによる方法について検討し、収束計算を行って上部構造と杭基礎-地盤系の応答を評価する方法を示した。この方法を用いてSwayモデルの応答評価を行い、上部構造-杭基礎一体モデルの時刻歴解析結果との比較により等価線形化法の妥当性の検討を行った。その結果、上記の復元力特性の評価手法のうち、地盤変形を無視して、杭頭加力のみによって杭基礎-地盤系の復元力特性を評価した場合は、等価線形化法による杭頭塑性率が時刻歴解析よりも過小評価となった。一方、地盤変形を作用させてから杭頭を加力して復元力特性を評価した場合は、上部構造と杭頭塑性率のいずれも時刻歴解析と概ね対応した。これより、本検討での等価線形化法は、杭基礎建物の応答評価手法として概ね妥当な方法であることを確認した。

以上のように、地盤変形を考慮した上で、杭基礎-地盤系の非線形化を等価線形化法に取り入れたことが本手法の特徴であると考えられる

第5章では、上部構造と杭基礎-地盤系の耐震診断法の構築を目的として、両者の破壊モードの判別法と、それを用いた耐震診断法について検討した。

まず、Swayモデルの上部構造と杭基礎-地盤系の変形の関係を、両者の復元力特性に基づく力の釣り合いによ

り評価し、その関係を変形推移曲線と定義した。その評価において、1 次モードの力の釣り合いに基づいて基礎に作用する慣性力を考慮することにより、等価線形化法の結果が変形推移曲線とほぼ一致することを示した。これより、基礎に作用する慣性力を考慮した変形推移曲線の評価方法が概ね妥当であることを確認した。

破壊モードの判別においては、変形推移曲線を上部構造と杭頭塑性率の関係である塑性率推移曲線に変換し、塑性率の関係図を破壊モード判別のクライテリアに応じて領域分割した。これを破壊モードの判別図と定義し、塑性率推移曲線がこの判別図のどの領域を通るかによって、上部構造破壊、杭基礎破壊、あるいは両方破壊からなる杭基礎建物の破壊モードを判別する方法を示した。ただし、この方法では破壊モードが判別されるのみであるため、破壊モードの判別と、Sway モデルの等価線形化法を用いた塑性率の絶対値の評価、およびその結果に基づく補強の要否の判定までの方法を示した。Sway モデルの等価線形化法を用いることから、上部構造と杭基礎の応答バランスを考慮した上で両方の耐震性を評価することが可能な方法であり、これを踏まえて Sway モデルによる等価線形化法を詳細法と位置付けて、以上に示した Sway モデルによる等価線形化法に基づく耐震診断法を詳細法として提案した。

これと合わせて、詳細法よりも簡便な評価方法として、Sway モデルを用いずに上部構造と杭頭塑性率を個別に評価する方法について検討し、その方法による塑性率が詳細法に対して安全側の評価となることを示した上で、詳細法による塑性率評価を組み合わせることで補強の要否を判定する方法を示した。ここで検討した上部構造と杭頭塑性率を個別に評価する方法が Sway モデルを用いない方法であることから、詳細法との対比でこの方法を簡便法と位置付けて、以上に示した上部構造と杭頭塑性率の個別評価に基づく耐震診断法を簡便法として提案した。

最後に、提案手法による岩ヶ崎高校と古川東中学校の耐震性の評価を行い、詳細法の場合は上部構造と杭基礎の両方破壊と判別された。簡便法の場合は、上部構造と杭基礎の両方破壊の領域となったことから、安全側の判断をして上部構造と杭基礎の両方補強と判定するか、または安全側の判断をせずに、詳細法により塑性率を評価して、その結果を元に補強の要否の再判定を行うという評価となった。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめるとともに、今後の課題と展望についても述べた。

以上に提案した Sway モデルの等価線形化法に基づく耐震診断法である詳細法と、上部構造と杭基礎の個別評価に基づく耐震診断法である簡便法により、杭基礎を含めた耐震診断法の構築が可能になるものと考えられる。また、提案法は、解析結果に基づいて評価された経験式を用いるという方法ではないため、一般性の確保の点からも有効な方法であると考えられる。

論文審査結果の要旨

鉄筋コンクリート造建物を対象とした現行の耐震診断法は、上部構造の耐震性を評価するものであり、杭基礎建物の場合でも杭基礎の耐震性は評価対象とされない。しかしながら、2011 年東北地方太平洋沖地震において、杭基礎の被害によって建物が沈下、傾斜したために、上部構造には大きな被害が生じていなくても解体される事例が見られたように、杭基礎建物の耐震性を評価する際には、上部構造と杭基礎の両方を対象とした耐震診断法が必要となる。これに鑑みて、本論文は上部構造と杭基礎・地盤系の耐震診断法の提案を目的に検討したもので、全 6 章よりなっている。

第 1 章は序論である。

第 2 章、第 3 章では、2008 年岩手・宮城内陸地震で上部構造に被害を受けた学校建物と、2011 年東北地方太平洋沖地震で杭基礎に被害を受けた学校建物の 2 つの杭基礎建物を対象に、実被害と解析結果の対応関係を検討している。この検討から、基礎固定モデルでは解析結果が実被害よりも大きめの評価となるのに対して、杭基礎・地盤条件を踏まえて非線形相互作用を考慮した連成系モデルでは両者が概ね対応することを示し、これにより、杭基礎建物の耐震診断法についても、耐震性の適切な評価のためには、杭基礎を含めた手法が必要であることを現状の課題として指摘している。

第 4 章では、上部構造と杭基礎・地盤系の耐震診断法への適用を念頭に、杭基礎・地盤系の非線形性を考慮した 2 質点系の Sway モデルによる等価線形化法について検討している。ここでは、杭基礎・地盤系の復元力特性を、地盤変形を作用させてから杭頭を加力する静的解析によって評価することにより、上部構造と杭頭塑性率のいずれも時刻歴解析と概ね対応する結果を示している。これより、本検討での等価線形化法は、杭基礎建物の応答評価手法として概ね妥当な方法であることを確認している。

第 5 章では、まず上部構造と杭基礎・地盤系の復元力特性から、力の釣り合いに基づいて上部構造と杭頭塑性率の関係を評価し、それを用いて上部構造と杭基礎の破壊モードを判別する方法を示している。これに続けて、Sway モデルの等価線形化法により上部構造と杭頭塑性率の絶対値を評価し、その結果を用いて補強の要否を判定する方法を示している。ここでは、Sway モデルの等価線形化法を詳細法と位置付けて、以上に示した耐震診断法を詳細法として提案している。さらに、Sway モデルを用いずに上部構造と杭頭塑性率を個別に評価し、詳細法よりも安全側の評価となることを示した上で、詳細法による塑性率評価を組み合わせることで補強の要否を判定する方法を示している。ここでは、上部構造と杭頭塑性率を個別に評価する方法を簡便法と位置付けて、以上に示した耐震診断法を簡便法として提案している。

第 6 章は結論である。

以上の通り、本論文は、鉄筋コンクリート造杭基礎建物を対象に、上部構造と杭基礎・地盤系の耐震診断法として、Sway モデルの等価線形化法に基づく詳細法と、上部構造と杭基礎の個別評価に基づく簡便法を提案するものであり、杭基礎建物の耐震性を、杭基礎まで含めた建物全体として向上させることに寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。